



GREEN WATER E IMPACTO DE ONDAS: ANÁLISE NUMÉRICA DA PROTEÇÃO POR GRELHAS USANDO O MÉTODO MPS

Lucas Isaac Lima Trindade - lucas.isaac@usp.br

Lucas Soares Pereira - lucas.pereira@usp.br

Rubens Augusto Amaro Junior - rubens.amaro@usp.br

Liang-Yee Cheng - cheng.yee@usp.br

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil - São Paulo, SP, Brasil

Resumo. Estruturas costeiras ou marítimas são suscetíveis a ações de impacto de ondas que podem ultrapassar a borda resultando no embarque de água (green water). O estudo do fenômeno de green water é de suma importância, pois ele pode acarretar em danos ou comprometer a operação em uma estrutura fixa ou flutuante. Grelhas com aletas inclinadas são opções interessantes de proteção por serem leves e induzir desvios no escoamento com uma dissipação significativa de energia de onda. Com o objetivo de investigar o desempenho de grelhas na proteção de estruturas, o método de partículas Moving Particle Semi-implicit (MPS) é utilizado para modelagem e simulação de green water. Casos com e sem anteparas sólidas e grelhas são comparados para situações isoladas de green water, aproximadas por um modelo de wet dam break. No geral, os resultados indicam que a antepara sólida vertical é a mais indicada na mitigação de forças de green water. No entanto, caso as forças nas proteções sejam uma restrição de projeto, as grelhas podem ser uma solução mais adequada.

Palavras-chave: Grelhas, Green water, Impacto de ondas, MPS, Método de partículas

1. INTRODUÇÃO

Estruturas oceânicas estão sujeitas a ação de ondas, podendo causar danos estruturais ou comprometer a segurança e as condições de operação. Um dos problemas considerados no projeto de estruturas oceânicas é o embarque de água, conhecido pelo termo *green water*. Dentre as opções utilizadas para mitigar o *green water*, quebra ondas vazados são proteções que se destacam por serem leves e por desviar o escoamento com dissipação significativa de energia de onda, garantindo maior integridade da estrutura e segurança operacional (Amaro Jr *et al.*, 2019; Buchner & Garcia., 2003; Pham & Varyani, 2006).

Para uma melhor compreensão das características hidrodinâmicas do embarque de água em uma estrutura fixa, situações isoladas de *green water* são simuladas numericamente usando um modelo de *wet dam break* (Hernández-Fontes *et al.*, 2020). O método numérico utilizado no presente trabalho foi o *Moving Particle Semi-implicit* (MPS), proposto por Koshizuka &

Oka (1996). O MPS é um método que não necessita de malha e adota descrição totalmente Lagrangiana, o que apresenta vantagens em comparação aos métodos Eulerianos com malha nas simulações de escoamentos com presença de grandes deformações, fragmentações e junções de superfície livre, pois não são necessárias técnicas de rastreamento de superfície livre ou *remeshing*.

De forma a mitigar os efeitos indesejados de *green water*, anteparas sólidas e grelhas com aletas inclinadas são analisadas. A região a ser protegida é modelada como uma parede retangular rígida. Volume de água embarcada, valores de força e impulso na proteção e parede protegida são analisados e comparados para se avaliar a capacidade de bloqueio da entrada de água e a eficiência na mitigação dos efeitos hidrodinâmicos pelas diferentes proteções.

2. MÉTODO NUMÉRICO

As equações governantes do escoamento incompressível são expressas pelas leis de conservação de massa e de quantidade de movimento:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\mathbf{f}}{\rho} + \mathbf{g}, \quad (1)$$

sendo ρ a densidade do fluido, \mathbf{u} o vetor velocidade, P a pressão, \mathbf{g} a aceleração gravitacional, \mathbf{f} as forças atuantes, ν a viscosidade cinemática e t o tempo.

No método MPS, os operadores diferenciais das equações governantes são aproximados por operadores discretos ponderados por uma função peso ω_{ij} , que expressa a contribuição de cada partícula vizinha j dentro de um suporte compacto Ω com raio de vizinhança r_e . A função ω_{ij} adotada no presente trabalho e o somatório de ω_{ij} , definido como a densidade do número de partículas pnd_i e proporcional a densidade do fluido, são calculados por:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} \frac{r_e}{\|\mathbf{r}_{ij}\|} - 1 & \text{se } \|\mathbf{r}_{ij}\| \leq r_e \\ 0 & \text{se } \|\mathbf{r}_{ij}\| > r_e \end{cases}, \quad pnd_i = \sum_{j \in \Omega} \omega_{ij}. \quad (2)$$

onde $\|\mathbf{r}_{ij}\| = \|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i\|$ é a distância entre duas partículas i e j , r_e é o raio de vizinhança pré-estabelecido com valor no intervalo $[2, 1; 4, 0] \times l_0$ (Koshizuka & Oka, 1996) e l_0 é a distância entre duas partículas adjacentes no instante inicial.

Para uma função escalar ϕ ou vetorial ϕ , os operadores gradiente, Laplaciano e divergente, utilizados no presente trabalho são aproximados por:

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{pnd_i^0} \sum_{j \in \Omega} \frac{\phi_{ij}}{\|\mathbf{r}_{ij}\|^2} \mathbf{r}_{ij} \omega_{ij}, \quad \langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda^0 pnd_i^0} \sum_{j \in \Omega} \phi_{ij} \omega_{ij}, \quad \langle \nabla \cdot \phi \rangle_i = \frac{d}{pnd_i^0} \sum_{j \in \Omega} \frac{\phi_{ij}}{\|\mathbf{r}_{ij}\|^2} \mathbf{r}_{ij} \omega_{ij}, \quad (3)$$

onde $\phi_{ij} = \phi_j - \phi_i$, d é o número de dimensões, pnd_i^0 é o valor da densidade do número de partículas inicial em um suporte compacto totalmente preenchido num grid reticulado e $\lambda^0 = \frac{\sum_{j \in \Omega} \omega_{ij}^0 \|\mathbf{r}_{ij}\|^2}{\sum_{j \in \Omega} \omega_{ij}^0}$ é um parâmetro de correção calculado no início da simulação.

2.1 Condições de contorno

Superfície livre. No presente trabalho foi adotada a técnica *Neighborhood Particles Centroid Deviation* (NCPD), proposta por Tsukamoto *et al.* (2016), para detecção das partículas de superfície livre. O NCPD tem um baixo custo computacional e utiliza dois critérios de detecção das partículas de superfície livre. A primeira etapa consiste em uma estimativa das partículas de superfície livre baseado no desvio do pnd_i como mostrado na Eq. 4. Posteriormente, uma filtragem baseada na assimetria da vizinhança, como apresentado na Eq. 5,

é realizada apenas em partículas que atenderam ao critério da primeira etapa, e caso a partícula atenda ambos os critérios ela é classificada como de superfície livre.

$$\begin{cases} pnd_i < \beta \cdot pnd^0 & \rightarrow i \text{ pode ser partícula de superfície livre} \\ \text{caso contrário} & \rightarrow i \text{ não é partícula de superfície livre} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j \in \Omega} \|\mathbf{r}_{ij} \omega_{ij}\|}{\sum_{j \in \Omega} \omega_{ij}}} > \delta \cdot l_0 \text{ ou } N_i \leq 4 & \rightarrow i \text{ é partícula de superfície livre} \\ \text{caso contrário} & \rightarrow i \text{ não é partícula de superfície livre} \end{cases}, \quad (5)$$

β é um parâmetro escalar determinado empiricamente entre 0,80 e 0,99 (Koshizuka & Oka, 1996), $\delta \geq 0,2$ (Tsukamoto *et al.*, 2016), e N_i representa o número de vizinhos da partícula i .

Parede rígida. As paredes rígidas são modeladas usando três camadas de partículas fixas. As partículas que entram em contato direto com o fluido são denominadas partículas de parede (*wall*) na qual a pressão é calculada resolvendo a Eq. 6, juntamente com as partículas de fluido. As partículas das duas camadas restantes são denominadas de partículas *dummy* e são utilizadas para garantir que o cálculo do *pnd* das partículas de parede esteja correto. Não é efetuado o cálculo de pressão nas partículas *dummy*. Para maiores detalhes, veja Duan *et al.* (2021).

2.2 Algoritmo

O algoritmo MPS é baseado no método da projeção (Chorin, 1967) para desacoplar velocidade e pressão (Eq. 1). Um esquema semi-implícito dividido em duas etapas é adotado: cálculo explícito (projeção) e implícito (correção). Na etapa explícita são estimadas as velocidades das partículas a partir da Eq. 1, desconsiderando o gradiente de pressão, e consequente cálculo das posições e *pnd*. Na parte implícita é realizado o cálculo da pressão por um sistema linear da equação de Poisson para a pressão (EPP) (Eq. 6). No presente trabalho adotamos a formulação do termo fonte *Time-scale Correction of Particle-level Impulses* (TCPI) (Cheng *et al.*, 2021):

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i^{t+\Delta t} - \frac{\rho}{\Delta t^2} \alpha_c P_i^{t+\Delta t} = C_s^2 \frac{\rho}{l_0^2} \frac{pnd^0 - pnd_i^t}{pnd^0} + C_s \frac{\rho}{l_0} \langle \nabla \cdot \mathbf{u} \rangle_i, \quad (6)$$

onde \mathbf{u}_i é o vetor velocidade da partícula i , pnd_i^t o número de densidade da partícula i no início do passo de tempo, α_c é o coeficiente artificial compressibilidade e C_s a velocidade de propagação de perturbação. Após o cálculo das pressões por meio do sistema linear, calcula-se os gradientes de pressão (Eq. 3) e são realizadas correções de posição e velocidade das partículas. Maiores detalhes do algoritmo podem ser encontrados em Cheng *et al.* (2021).

3. GREEN WATER APROXIMADO POR WET DAM BREAKING

No presente trabalho, utilizou-se um modelo de *wet dam breaking* (Hernández-Fontes *et al.*, 2020) para geração de casos isolados de *green water* numa estrutura fixa. Considerando a simetria geométrica transversal do experimento físico 3D, adotou-se um modelo 2D de tanque retangular com comprimento 1,0 e altura 0,45 m, e região de embarque de água de comprimento $b_0 = 0,18$ m para obtenção de forças verticais (balança no experimento). A região a ser protegida é modelada como uma parede retangular sólida de altura $a_0 = 0,15$ m. Anteparas sólidas e grelhas são utilizadas como proteção. O modelo tem duas colunas d'água de alturas iniciais h_0 e h_1 , conforme Fig. 1. As propriedades físicas do fluido, parâmetros numéricos e alturas iniciais das colunas d'água, são apresentados, respectivamente, na Tabela 1 e Tabela 2.

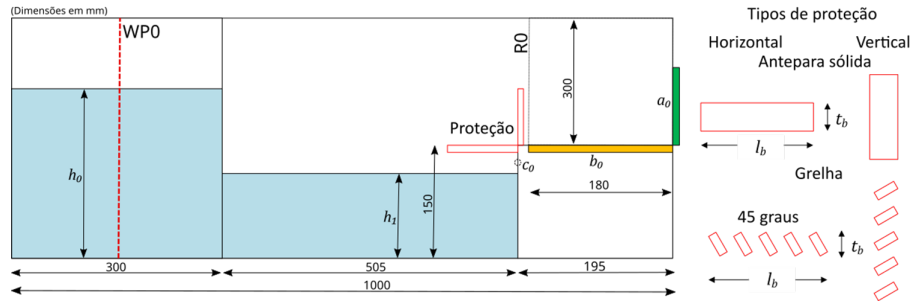


Figura 1- Geometria inicial e dimensões principais do modelo de *wet dam breaking*.

Tabela 1- Propriedades físicas e parâmetros de simulação

Propriedade	Valor	Parâmetro	Valor
Densidade do fluido (ρ)	1001kg/m ³	Raio efetivo ($r_{e,small}; r_{e,large}$)	(2, 1 \times l_0 ; 4 \times l_0)
Viscosidade cinemática (ν)	10 ⁻⁶ m ² /s	Superfície livre ($\beta; \delta$)	(0, 98; 0, 2)
Aceleração da gravidade (g)	9, 81m/s ²	Velocidade de propagação (C_s)	1, 0m/s
		Fator de compressibilidade (α)	10 ⁻⁸ ms ² /kg

Tabela 2- Alturas iniciais das colunas d'água do modelo de *wet dam breaking*

Caso estudado	Altura h_0	Altura h_1
C1 – situação moderada	0, 171m	0, 120m
C4 – situação extrema	0, 300m	0, 120m

4. CONVERGÊNCIA NUMÉRICA

Para o estudo de convergência do MPS foi utilizado o caso mais extremo C4, sem proteção. Resolução, distância e número de partículas, passo de tempo e tempo computacional para simulação de 2,0 s são apresentados na Tabela 3. As simulações foram realizadas em 20 cores AMD CPU Intel®Xeon®Processor E5 v2, 2,80 GHz e 126 GB de memória.

Ao invés de considerar os picos de pressão, que são mais sensíveis e propensos a variações nas simulações numéricas, foram comparados os impulsos $I_p = \int_0^{t_p} P_{c_0} dt$, corresponde à integração temporal do primeiro pico de pressão no ponto c_0 , conforme ilustrado na Fig. 1. Como a duração do primeiro pico varia de caso a caso, a integração foi realizada entre os instantes 0 e t_p , sendo durações distintas e representativas do pico de pressão.

Pela Tabela 3, o impulso da pressão converge para $\approx 1000 \text{ Nsm}^{-2}$ com resolução $h_1/l_0 \geq 128$. Assim, simulações com distância entre partículas $l_0 = 0,938 \text{ mm}$ devem fornecer resultados semelhantes a simulações com modelos mais refinados. Embora demande um maior tempo computacional, adotou-se $l_0 = 0,468 \text{ mm}$ ($h_1/l_0 = 256$) para as simulações visando uma discretização mais precisa das pequenas geometrias presentes nas grelhas.

Tabela 3- Convergência: Parâmetros numéricos e calculados para simulações de 2,0 s

Resolução h_1/l_0	16	32	64	128	256
Distância de partículas (mm)	7, 500	3, 750	1, 875	0, 938	0, 468
Número de partículas	3449	12259	45873	177461	697489
Passo de tempo (ms)	0, 20	0, 20	0, 10	0, 05	0, 02
Tempo computacional (h)	0, 02	0, 05	0, 50	6, 25	42, 00
Impulso de pressão (Nsm ⁻²)	804	916	930	1010	1000

5. VALIDAÇÃO DO MPS

A Figura 2 apresenta alguns instantes de tempo das simulações usando MPS e imagens do experimento realizado por Hernández-Fontes *et al.* (2020) para os casos C1 e C4 sem proteções, respectivamente. Das Figuras 2(a)-2(c), nota-se que os resultados numéricos apresentam uma boa concordância com os experimentos do caso C1 durante os eventos de embarque, impacto e consequente subida de fluido (*run-up*) na parede protegida. No caso mais extremo C4, ver Fig.s 2(d)-2(f), de forma geral a simulação numérica reproduz satisfatoriamente o comportamento do fluido. No entanto, nota-se algumas discrepâncias entre o numérico e experimental durante o impacto do fluido com a parede protegida, $t = 0,642s$, e após o impacto do fluido na parede vertical no instante $t = 0,934s$. Por se tratar de instantes mais complexos com fragmentação e junção do escoamento, tais discrepâncias são aceitáveis de um ponto de vista prático da engenharia. Em ambas as simulações o campo de pressão calculado é estável e apresenta uma distribuição espacial contínua.

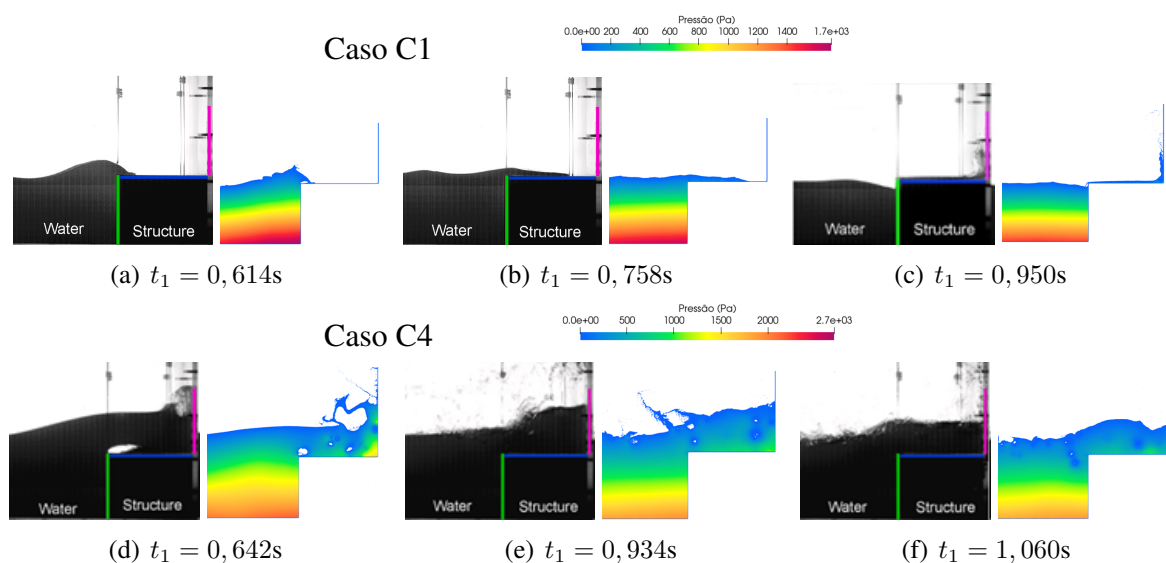


Figura 2- C1 e C4: Simulação MPS com $l_0 = 0,468mm$ e experimento (Hernández-Fontes *et al.*, 2020).

A Figuras 3(a) e 3(b) mostram dados experimentais de elevação de onda em WP0 e valores calculados pelo presente MPS e com o método *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) (Gingold & Monaghan, 1977; Lucy, 1977), conforme apresentado em (Hernández-Fontes *et al.*, 2020).

No geral, os resultados numéricos apresentam uma boa concordância com os valores experimentais para ambos os casos C1 e C4. No entanto, observa-se uma pequena defasagem entre os resultados numérico e experimental em C1, semelhante ao observado com o SPH (Areu-Rangel *et al.*, 2021). Essa defasagem, evidenciada por um pico de altura de onda no experimento em torno de $t = 0,6 s$, trata-se de uma onda de retorno formada conjuntamente com a onda de avanço mais proeminente durante o colapso da coluna d'água pela ação da gravidade. No experimento, ocorre a interação entre o fluido e comporta durante sua abertura devido a forças cisalhante e normal (pressão), influenciadas pela velocidade de abertura, espessura e rugosidade da comporta, e viscosidade do fluido. Representar numericamente essas características é um desafio considerável em termos de estabilidade e precisão da simulação, e que foi ignorado no nosso modelo computacional, podendo ser uma das causas da diferença observada na Fig. 3(a). Uma discussão sobre esse efeito pode ser encontrada em Areu-Rangel *et al.* (2021) e

Jandaghian *et al.* (2021). Outra explicação para a diferença observada é a dissipação numérica inerente a modelos computacionais, em especial métodos de partículas como o MPS e o SPH, relacionada a modelagem do contorno na parede (Pereira *et al.*, 2021) e efeitos da uniformidade de distribuição partículas nos operadores numéricos (Cheng *et al.*, 2021).

A Figuras 3(c) e 3(d) ilustram a força vertical na região de embarque de água de comprimento $b_0 = 0,18$ m obtida pelo MPS usando $l_0 = 0,468$ mm (dados brutos sem filtragem), destacada em azul, para C1 e C4, juntamente com resultados do SPH e séries temporais de 4 repetições experimentais.

Durante o embarque da onda em C1 ocorre um pico de força ao redor de $t = 0,80$ s, ver Fig. 3(c). Após o impacto do fluido com a parede vertical a_0 e consequente *run-up*, parte do fluido que cai sob a ação da gravidade exerce uma força vertical adicional sobre a balança b_0 , representado pelo pico em torno de $t = 1,05$ s. O fluido retorna, aliviando a força sobre b_0 .

No caso C4 ocorrem forças de magnitude 10 vezes superior às forças em C1. O impacto da onda sobre a_0 é representado pelo pico de força aproximadamente em $t = 0,65$ s nos experimentos, $t = 0,55$ s na simulação com MPS e $t = 0,60$ s com SPH. Assim, o impacto em ambas as simulações apresenta uma defasagem de tempo em relação ao experimento.

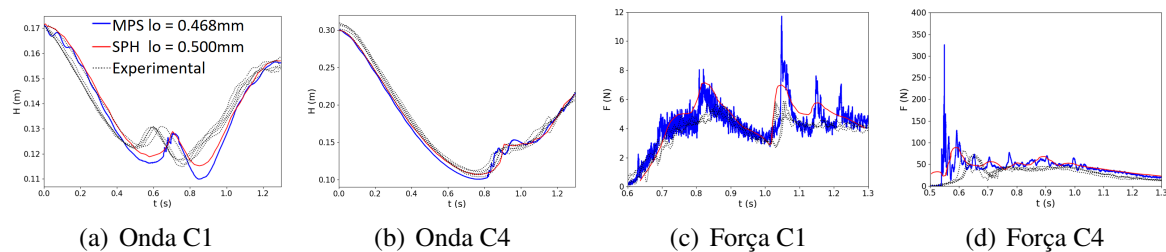


Figura 3- Elevações de onda em WP0 e Forças verticais calculadas pelo método MPS, SPH (Areu-Rangel *et al.*, 2021) e séries temporais experimentais (Hernández-Fontes *et al.*, 2020) para casos C1 e C4.

De forma geral, os valores calculados de força para o caso C1 apresentam uma boa concordância com os resultados experimentais e com o modelo SPH. Para o caso mais extremo C4, os valores de força calculados com MPS e SPH seguem a mesma tendência dos resultados experimentais, porém com valores superestimados. Possíveis causas dessas diferenças, comparadas aos resultados experimentais, podem estar relacionadas aos efeitos de compressibilidade do fluido e aprisionamentos de ar (amortecimento da força calculada), desconsiderados nas presentes simulações. Apesar da simetria geométrica transversal dos casos, possíveis efeitos 3D também são omitidos nas simulações 2D e podem ser causas das diferenças.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item, são estudados casos com presença de proteções horizontais e verticais, modeladas com anteparas sólidas e grelhas (aletas internas inclinadas em 45°) de comprimentos $l_b = 0,040$ e $0,075$ m, e espessura $t_b = 0,006$ m (considerando a escala aproximada do experimento 1:60, as proteções em escala real teriam dimensões $l_b = 2,4$ e $4,5$ m e $t_b = 0,36$ m).

6.1 Força na parede protegida

A Figura 4 mostra a força horizontal sobre a parede protegida a_0 .

Para o caso C1, a antepara sólida vertical de comprimento $l_b = 0,040$ m reduz drasticamente a força, ver Fig. 4(a), ao passo que o aumento do comprimento para $l_b = 0,075$ m garante total

proteção, conforme evidenciado pela força horizontal nula, ver Fig. 4(b). As proteções do tipo: antepara sólida horizontal, grelha horizontal e vertical, reduzem a magnitude das forças a aproximadamente metade dos valores da força no caso sem proteção. Além disso, o aumento do comprimento dessas proteções tem pouca influência sobre a força.

No caso C4, a antepara sólida vertical apresenta uma redução de força mais evidente para proteções com $l_b = 0,040$ m, apesar de altos picos, conforme apresentado na Fig. 4(c). Com o aumento do comprimento para $l_b = 0,075$ m, a antepara sólida e grelha verticais garantem uma maior mitigação da força ao longo do tempo, associada a redução de picos entre 20 e 40% em relação a situação sem proteção, como visto na Fig. 4(d). Vale salientar que por ser tratar de um caso mais extremo e complexo, a análise dos picos de força na condição C4 não é tão efetiva. Possíveis instabilidades numéricas podem ocasionar picos de força que não representam necessariamente o comportamento físico esperado.

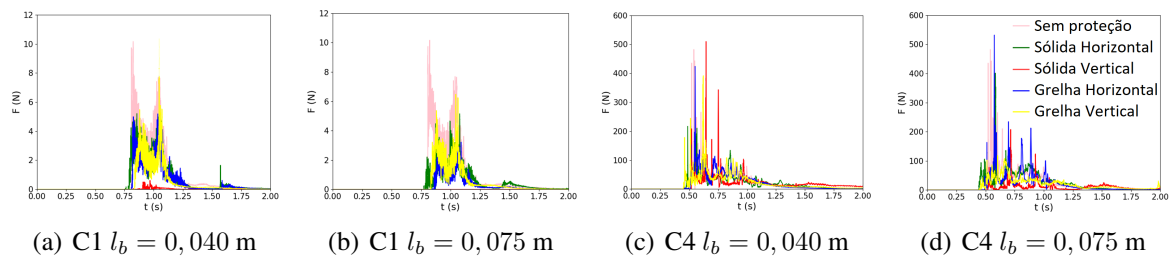


Figura 4- Forças horizontais na parede protegida.

6.2 Força na antepara sólida e grelha

Os gráficos na Fig. 5 representam as resultantes das forças nas proteções.

Para o caso C1, ocorre *run-up* de parte do fluido antes do seu embarque. Essa parcela de fluido é obstruída de forma abrupta pela antepara sólida horizontal, evidenciado pelo maior pico de força próximo do instante $t = 0,5$ s, diferentemente da grelha horizontal onde o fluido é desviado e um menor pico de força é computado.

Para o caso C4, a força exercida na grelha é menor em comparação a antepara sólida, pois a grelha permite a passagem de fluido por suas aletas, diferente da obstrução direta nas anteparas sólidas, ver Fig. 5(c)-5(d). O aumento do comprimento das anteparas sólidas leva a um aumento considerável das forças, em consequência da obstrução de uma maior parcela de fluido.

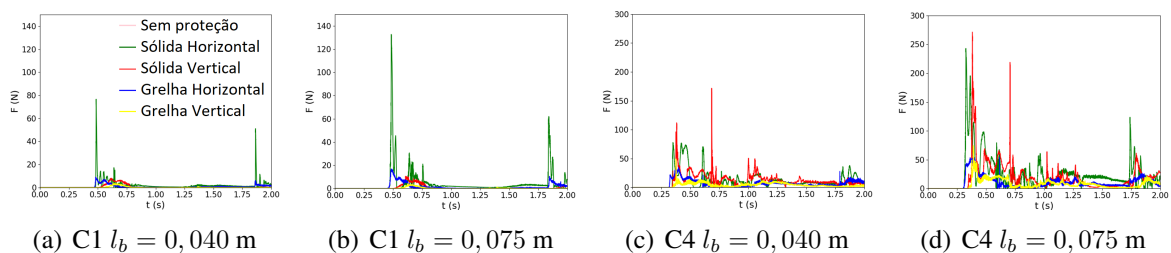


Figura 5- Forças resultantes nas anteparas sólidas e grelhas de comprimentos $l_b = 0,040$ e $0,075$ m.

6.3 Impulso na parede protegida, antepara sólida e grelha

Para melhor compreensão da mitigação da força pelos diferentes tipos de proteção, analisamos o impulso da força $\mathbf{I}_F = \int_0^{t_f} \mathbf{F} dt$ em função do tamanho da proteção l_b . A partir dos resultados das simulações, observou-se que o instante representativo t_f logo após

o impacto do fluido sobre a parede protegida é $t_f = 1,3$ s para C1 e $t_f = 1,7$ s para C4, ver Fig. 4. Usando como valores de referência os impulsos nos casos sem proteção, calculou-se a Redução = $\left| \frac{\text{Valor}_{ref} - \text{Valor}}{\text{Valor}_{ref}} \right| \times 100\%$ nos impulsos pelas proteções.

A Figura 6(a) apresenta os resultados de impulso na parede protegida a_0 , ver Fig. 1, em função do tamanho da proteção. Para C1, as maiores reduções no impulso de aproximadamente 98 e 100% ocorrem nas anteparas sólidas verticais de comprimento $l_b = 0,040$ e $0,075$ m, respectivamente. Para proteções com $l_b = 0,040$ m, as grelhas vertical e horizontal apresentam redução no impulso de aproximadamente 50 e 44%, respectivamente, seguidas pela antepara sólida horizontal com redução aproximada de 30%. O aumento do comprimento l_b das proteções leva a uma melhora considerável nas proteções horizontais, com redução no impulso de cerca de 77% na grelha horizontal e 62% na antepara sólida horizontal.

Conforme apresentado na Fig. 6(a), para o caso C4, as anteparas sólidas verticais novamente promovem as maiores reduções no impulso em cerca de 40 e 75%, respectivamente nas proteções com $l_b = 0,040$ e $0,075$ m. O aumento de l_b melhora a eficiência das grelhas horizontal e vertical com respectivas reduções de impulso de 11 e 16%, porém aumenta a força pela antepara sólida horizontal. A redução do impulso na antepara sólida horizontal com $l_b = 0,040$ m é de aproximadamente 30%, enquanto para $l_b = 0,075$ m redução é de apenas cerca de 9%. Uma análise mais aprofundada das causas desse aumento no impulso com aumento do comprimento da antepara sólida horizontal é um tópico para estudo futuro.

Os módulos dos impulsos sobre a proteção (antepara sólida e grelha) são mostrados na Fig. 6(b). Para o caso C1, os maiores impulsos ocorrem nas anteparas sólidas horizontais, seguidos por valores intermediários nas grelhas horizontais e anteparas sólidas verticais, e menores valores nas grelhas verticais. Para o caso mais extremo C4, as anteparas sólidas apresentam os maiores valores de impulso, seguidos por valores menores nas grelhas horizontais e verticais. Em suma, o aumento no comprimento das proteções acarreta o aumento do impulso.

Pela análise quantitativa dos resultados de impulso, a antepara sólida vertical é a mais indicada na mitigação de forças de *green water*, pois apresenta os menores valores de impulso na parede protegida. No entanto, ocorrem impulsos significativos na proteção. Assim, caso as forças máximas nas proteções sejam uma restrição importante de projeto, as grelhas podem ser uma solução mais adequada a ser adotada por apresentarem menores valores de impulso.

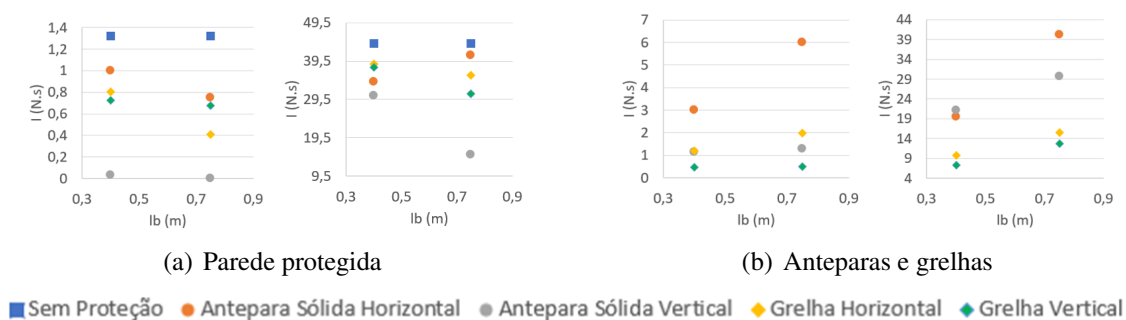


Figura 6- Impulso I_F na (a) parede protegida e (b) proteções em função dos comprimentos das proteções.

6.4 Volume de água embarcada

O volume médio de água $V_m = \frac{1}{t_f - t_0} \int_{t_0}^{t_f} V dt$ embarcada na região R0, ver Fig. 1, foi calculado entre t_0 , o instante a partir do embarque de água em cada um dos casos, e t_f , uma aproximação para o fim do embarque de água, com $t_f = 1,3$ s para C1 e $t_f = 1,7$ s para C4.

Para C1, as proteções de maior comprimento l_b são mais eficientes na redução do embarque de água, conforme Fig. 7(a). Para as proteções com $l_b = 0,075$ m, o percentual de redução de volume de água é de aproximadamente 100% para antepara sólida vertical, seguido por antepara horizontal com 56%, grelha horizontal com 42% e grelha vertical com 32%.

Para C4, Fig. 7(b), os menores valores de volume médio de embarque de água também ocorrem com a antepara sólida vertical, demonstrando assim a maior eficiência em todos os cenários analisados. De forma semelhante ao constatado anteriormente para impulso na parede protegida, ver Fig. 6(a), o aumento do comprimento l_b resulta em: i) diminuição do volume médio, maior eficiência, para os casos com grelhas horizontal e vertical com respectivas reduções de aproximadamente 16% e 26%; ii) leve aumento no volume de água embarcada no caso com antepara sólida horizontal.

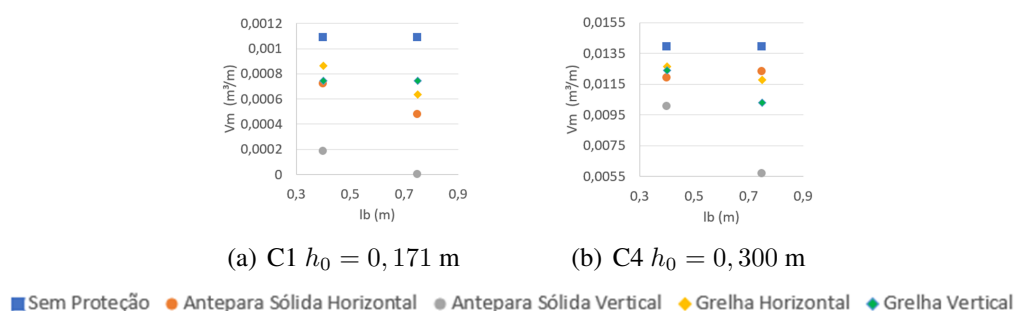


Figura 7- Volume de fluido na região R0, ver Fig. 1, para os casos (a) C1 e (b) C4.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, realizamos o estudo numérico computacional do embarque de água (*green water*) em uma região fixa com e sem proteção, com auxílio do método de partículas MPS. Foram investigadas proteções do tipo antepara sólida e grelha, nas posições horizontal e vertical, e de comprimentos $l_b = 0,040$ e $0,075$ m. Dois casos de embarque foram considerados, nomeadamente um moderado C1 e mais extremo C4.

Usando como referência os valores calculados nos casos sem proteção, analisamos a redução no impulso devido à força na parede protegida. Para o caso moderado C1, a maior redução de impulso foi obtida pela antepara sólida vertical, seguida pela grelha vertical para proteções com $l_b = 0,040$ m, e grelha horizontal para $l_b = 0,075$ m. Para o caso mais extremo C4, novamente a antepara sólida vertical garantiu a maior redução de impulso, seguida pela antepara sólida horizontal com proteções com $l_b = 0,040$ m, e grelha vertical para o comprimento $l_b = 0,075$ m.

Analisando os volumes médios de água embarcada e usando como referência os casos sem proteção, a antepara sólida vertical obteve as maiores obstruções de embarque de água em todas as condições estudadas. Para proteções com $l_b = 0,04$ m, valores próximos de embarque de água foram calculados para antepara sólida horizontal e grelhas em ambas as condições C1 e C4. Com o aumento do comprimento da proteção para $0,075$ m, a menor obstrução ocorreu para a grelha vertical em C1, enquanto a antepara sólida horizontal teve a menor obstrução em C4.

Apesar de significantes reduções de impulso na parede protegida e reduções de volume de água embarcada com as proteções do tipo sólida vertical, os impulsos nessas proteções apresentam valores de magnitude relevantes para o caso C4. Assim, como os impulsos relativos as forças nas grelhas apresentam menores magnitudes, as grelhas podem ser uma solução mais adequada a ser adotada em situações mais severas, caso a força na proteção seja uma restrição importante de projeto.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa Unificado de Bolsas de Estudos para Apoio e Formação de Estudantes de Graduação (PUB-USP) da PRP-USP pela bolsa de IC.

REFERENCES

- Amaro Junior, R.A.; Cheng, L.Y. and Vieira Rosa, S. (2019). Numerical Study on Performance of Perforated Breakwater for Green Water, *J. Waterw. Port. Coast. Ocean Eng.*, 145(6).
- Areu-Rangel, O.S.; Hernández-Fontes, J.V.; Silva, R.; Esperança, P.T.T. and Klapp, J. (2021), Green water loads using the wet dam-break method and SPH. *Ocean. Eng.*, 219.
- Buchner, B. and Garcia, J.L.C. (2003), "Design aspects of green water loading on FPSOs", *22nd OMAE*.
- Cheng, L.Y.; Amaro Junior, R.A. and Favero, E.H. (2021), Improving stability of moving particle semi-implicit method by source terms based on time-scale correction of particle-level impulses. *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 131.
- Chorin, A.J. (1967), The numerical solution of the Navier–Stokes equations for an incompressible fluid, *Bull. Amer. Math. Soc.*, 73(6), 928-931.
- Duan, G.; Matsunaga, T.; Yamaji, A.; Koshizuka, S. and Sakai, M. (2021), Imposing accurate wall boundary conditions in corrective-matrix-based moving particle semi-implicit method for free surface flow. *Int. J. Numer. Methods Fluid*, 93(1).
- Gingold, R.A. and Monaghan, J.J. (1977), Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 181(3).
- Hernández-Fontes, J.V.; Vitola, M.A.; Esperança, P.T.T.; Sphaier, S.H. and Silva, R. (2020), Patterns and vertical loads in water shipping in systematic wet dam-break experiments. *Ocean. Eng.*, 197.
- Jandaghian, M.; Krimi, A.; Shakibaeinia, A. (2021), Enhanced weakly-compressible MPS method for immersed granular flows. *Adv. Water Resour.*, 152.
- Koshizuka, S. and Oka, Y. (1996), Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. *Nuclear Sci. Eng.*, 123(3).
- Lucy, L.B. (1977), A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astron. J.*, 82.
- Pereira, L.S.; Amaro Junior, R.A. and Cheng, L.Y. (2021), "The Influence of Wall Boundary Modeling on the Unphysical Frictional Loss Inside Horizontal Main Drain", *18th ICCCB*.
- Pham, X.P. and Varyani, K.S. (2006), Generic Design of V-Shape and Vane-Type Breakwaters to Reduce Green Water Load Effects on Deck Structures and Containers of Ships: Case Study. *J. Waterw. Port. Coast. Ocean Eng.*, 132(1).
- Tsukamoto, M.M.; Cheng, L.Y. and Motezuki, F.K. (2016), Fluid interface detection technique based on neighborhood particles centroid deviation (NPCD) for particle methods. *Int. J. Numer. Methods Fluid*, 82(3).

GREEN WATER AND WAVE IMPACT: NUMERICAL ANALYSIS OF PROTECTION BY GRATING USING THE MPS METHOD

Abstract. *Coastal or marine structures are subject to wave impact loads due to water on deck events (green water). The study of the green water phenomenon is of great importance in maritime and coastal areas, because it can result in damage or compromise the operation of fixed or floating structures. Gratings with inclined small-spaced elements are interesting protections, since they are lightweight and deviates the flow with a significant wave energy dissipation. In order to investigate the performance of gratings against green water loads on structures, the Moving Particle Semi-implicit (MPS) method is used to model and simulate the green water phenomenon. Cases with and without solid breakwaters and gratings are compared for isolated green water events, approximated by a wet dam break model. In summary, the results show that the solid vertical breakwater is the best option for mitigating green water forces. However, if the forces on the breakwater is a design constraint, gratings can be a more suitable solution.*

keywords: *Gratings, Green water, Wave impact, MPS, Particle method*